

에너지분야 농림업부문 온실가스 인벤토리 고도화 방안 연구

추성민, 문지혜, 김연중, 성재훈*
한국농촌경제연구원

A Study on the Improvement of GHG Inventory in Agriculture and Forestry Categories of Energy Sector

Sungmin Cheu, Jihye Moon, Yeanjung Kim, Jae-hoon Sung*
Korea Rural Economic Institute

요약 지금의 농업부문을 포함한 에너지 분야의 온실가스 배출량 산정방법은 하향식(top-down) 방식으로 간주할 수 있으며, 이러한 하향식 온실가스 산정 방법은 제한된 배출계수와 활동자료를 바탕으로 온실가스 인벤토리를 효과적으로 작성할 수 있는 방법이다. 그러나 에너지분야 농림업부문 온실가스 저감 정책 설계를 위해서는 보다 정교한 에너지분야 농림업부문 온실가스 배출량 정보 구축이 필요하다. 이를 위해 현재 온실가스 배출량 산정방식에 대해 살펴본 후, 에너지분야 농림업부문 온실가스 배출량 산정과 관련한 개선방안에 대해 논의한다. 먼저 에너지분야 농림업부문 배출현황에 대한 엄밀한 파악과 구체적 정책 설계를 위해 2006 IPCC 가이드라인, 해외 국가온실가스인벤토리 보고서, 국내 통계, 관련 문헌 등을 고려하여 세분화된 국가고유 배출계수의 개발과 관련 활동자료 구축 방안을 제안하였다. 구체적으로 다음으로 2006 IPCC 가이드라인을 바탕으로 농업부문 CO₂ 배출량의 불확도(uncertainty)를 계측하고 불확도 개선을 위한 방안을 제시하였으며, 이를 통해 CO₂ 배출량 불확도를 약 1.5%p 감소시킬 수 있음을 보였다. 끝으로 온실 난방 등에 사용되는 농업부문 신재생에너지 사용으로 인한 온실가스 배출량을 반영할 수 있는 활동자료 개선 방안을 제안하였다.

Abstract Greenhouse Gas (GHG) emissions from agriculture and forestry sources in the energy sector have been estimated based on a top-down approach, which is an efficient way to estimate GHG emissions with the limited number of emission factors and activity data. On the other hand, for GHG abatement policies, more detailed information and data on GHG emissions are required. This study discusses how to improve the estimates of GHG emissions from the agricultural and forestry sources in the energy sector. To this end, this paper reviews the current estimation method of GHG emissions and presents three suggestions to enhance the current method. First, the development of country specific emission factors and corresponding activity data is proposed based on the 2006 IPCC Guidelines, National Greenhouse Gas Inventory Reports from other countries, and Domestic Statistics. Second, the uncertainty in CO₂ emissions from agriculture in energy sector based on 2006 IPCC Guidelines is estimated, and ways of reducing the uncertainty in CO₂ emissions are suggested. Finally, a potential way to reflect the GHG emissions from the use of renewable energy is suggested.

Keywords : Climate Change, Greenhouse Gas Inventory, Energy Sector, Agriculture and Forestry, Uncertainty

본 논문은 농촌진흥청 연구과제(과제번호: PJ0141812019)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jae-hoon Sung(Korea Rural Economic Institute)

email: jsung@krei.re.kr

Received September 2, 2019

Revised October 29, 2019

Accepted November 1, 2019

Published November 30, 2019

1. 서론

1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC: UN Framework Convention on Climate Change, 이하 UNFCCC)은 모든 당사국들의 국가 온실가스 인벤토리 작성을 원칙적으로 의무화하고 있으며, 1998년 교토의정서(Kyoto Protocol)는 유엔기후변화협약 내 부속서 I에 속한 당사국들이 국가 인벤토리 보고서(National Inventory Report)를 작성하여 유엔기후변화협약 사무국에 보고하도록 하고 있다[1]. 우리나라는 「에너지기본법」을 근거로 2009년까지 지식경제부(현 산업통상자원부)에서 온실가스 인벤토리 보고서를 작성하였으며, 2010년부터는 「저탄소 녹색성장기본법」에 따라 환경부 산하 온실가스종합정보센터에서 통계를 총괄·관리하고 있다.

온실가스 인벤토리는 1)국가별 온실가스 배출량 추세와 주요 배출원 파악, 2)배출량 감축 관련 적절한 방안 마련 및 우선순위 결정, 3)모니터링 및 검증, 4)국가별 감축 공약에 대한 검증 등을 가능하게 한다는 점에서 매우 중요한 자료이다[2]. 이러한 중요성으로 인해 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)는 산정지침을 지속적으로 개선하고자 하며, 상위의 방법론을 활용한 인벤토리 작성을 권고하고 있다.

우리나라는 「1996 IPCC 가이드라인」을 기본으로 온실가스 인벤토리를 작성하고 있으며 2023년부터 「2006 IPCC 가이드라인」을 기준으로 공식 통계를 작성하기로 결정하고 준비 작업을 진행하고 있다[3]. 산정방법론의 경우 대부분 Tier 1 수준이며 자세한 활동자료나 국가고유 배출계수가 개발된 일부 부문에 대해 Tier 2 방법론을 적용하고 있다[4].

현재 상위 방법론을 적용하여 부문별 온실가스 배출량 통계의 정확성을 향상시키기 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다. 이현주(2011)는 에너지분야 수송부문에 대해 상위 방법론 적용을 위한 개선방안을 검토하였으며, 항공, 철도, 해운은 Tier 2 방법론, 주요 배출원인 도로는 Tier 3 방법론 적용을 제안하였다[5]. 송기봉 외(2017)는 군사부문에 대해 배출원의 특성을 반영한 산정방법과 배출계수가 제공되지 못하고 있음을 지적하며, 군사부문의 다양한 배출원을 고려할 수 있는 배출목록 체계를 검토하고 산정방법에 대해 연구를 진행하였다[6]. 구체적으로 Tier 1 방법을 적용하여 2013년 군사부문의 배출량을 2,656천 톤 CO₂eq.로 추정하였으나 Tier 2 방법론의 적용은 우리나라 군 장비 특성을 반영한 배출계수의 부

재, 군함 및 군항공기 운항정보에 대한 접근성 제한으로 한계가 있음을 밝혔다. 정현철 외(2012)는 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용하여 경중부문 온실가스 배출량을 16개 지자체별로 평가하고 배출량 차이를 분석하였다[7]. 그러나 정현철 외(2012)는 국내 농업환경을 반영할 수 있는 국가고유 배출계수와 신뢰도 높은 활동자료의 부재로 「2006 IPCC 가이드라인」의 기본 배출계수를 사용한 것을 한계로 언급하며 향후 배출계수 개발과 세부 활동자료 구축이 필요함을 제시하였다.

한편, 온실가스 배출량 산정 외에도 이와 관련한 불확도에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 진봉걸 외(2016)는 모든 부문에 Tier 2 방법을 적용하기 어려움을 고려하여, Tier 1 방법과 Tier 2 방법을 복합하여 불확도를 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다[8]. 장효미·진봉걸(2015)은 철강산업에 대해 Tier 2 방법론을 적용하여 불확도를 평가하였으며 에너지원의 소비량에 어떠한 불확실성 분포를 가정하는가에 따라 불확도의 차이가 크게 발생할 수 있다고 제시하였다[9].

신재생에너지 온실가스 배출량 산정에 대해서도 최근 연구가 이루어지고 있다. 정재형·김기만(2017)은 산정방법에 따라 온실가스 감축산정에 대한 신뢰성이 달라질 수 있으므로 바이오에너지 세부기술 수준에 따른 온실가스 감축량 고도화 산정연구가 필요하다고 주장하였다[10]. 또한 시나리오 분석을 통해 바이오에너지 기술의 발전효율, 가동률, 누적보급량 등이 온실가스 감축에 긍정적인 영향을 미치고 있음을 분석하였으며 특히 누적보급량의 온실가스 감축 잠재량이 가장 큰 것으로 나타났다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 최근 연도인 2016년도 기준 에너지분야 농림업부문 온실가스 인벤토리 작성 현황에 대해 살펴본다. 제3장에서는 앞서 살펴본 현황을 바탕으로 통계 정확성 제고 및 고도화를 위한 세부 방안을 가능한 부분에 대해 적용하고 이에 대해 논의한다. 끝으로 제4장에서는 본 연구를 요약하고 결론 및 한계 등을 제시하였다.

2. 에너지분야 농림업부문 온실가스

인벤토리 작성 현황

에너지분야의 CO₂, CH₄ 그리고 N₂O 배출량은 식(1)과 식(2)를 통해 산정된다. CO₂ 배출계수의 경우, 1990년부터 2006년까지는 1996 IPCC 기본 배출계수를 이용하며, 2007년 이후에는 5년마다 갱신되는 국가고유

배출계수를 적용하고 있다. 국가 고유 배출계수가 개발되지 않은 연료에 대해서는 기존의 「1996 IPCC 가이드라인」의 기본 배출계수를 적용하고 있다. 탄소물질입과 산화물 등과 같은 계수는 「1996 IPCC 가이드라인」이 제공하는 계수를 이용하고 있다

CH₄와 N₂O의 배출계수 역시 국가고유 배출계수를 우선적으로 적용하며, 국가고유 배출계수가 존재하지 않는 연료는 「1996 IPCC 가이드라인」의 기본 배출계수를 적용하고 있다. 하지만 연료의 불완전 연소로 인해 발생하는 CH₄와 N₂O의 배출계수는 연소 기술 즉, 고정연소와 이동연소에 따라 달라진다. 따라서 CH₄와 N₂O의 배출량 산정 시에는 고정연소에 사용된 연료량과 이동연소에 사용된 연료량의 상대적 비중을 가중치로 이용하여 고정형 연소 배출계수와 이동형 연소 배출계수를 가중 평균한 값을 CH₄와 N₂O의 배출계수로 사용한다.

$$E_{ij}^c = \sum \left[\begin{aligned} & (TA_{ij} - NA_{ij} \times FCS_{ij}) \\ & \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \\ & \times OF_i \times 44/12 \times 10^{-3} \end{aligned} \right] \quad (1)$$

Where, E_{ij}^c denotes CO₂ emissions, TA_{ij} denotes total activity, NA_{ij} denotes non-energy use activity, FCS_{ij} denotes fraction carbon storage, CF_i denotes conversion factor, EF_i denotes emission factor, OF_i denotes oxidation factor, i denotes fuel type and j denotes category.

$$E_{ijk}^{nc} = \Sigma [TA_{ijk} \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 10^{-6}] \quad (2)$$

Where, E_{ijk}^{nc} denotes CO₂ emissions, TA_{ijk} denotes total activity, CF_i denotes conversion factor, EF_i denotes emission factor, i denotes fuel type and j denotes equipment type, k denotes category.

위의 식에서 알 수 있듯이, 에너지분야의 CO₂, CH₄ 그리고 N₂O 배출량 산정을 위해서는 총에너지 사용량 (total activity)에 대한 활동자료가 필요하다. 현재 에너지분야 농업부문의 온실가스 배출량 산정을 위한 활동 자료로는 에너지밸런스, 석유류수급통계, 에너지통계연보 그리고 에너지총조사가 이용된다. 구체적으로 에너지

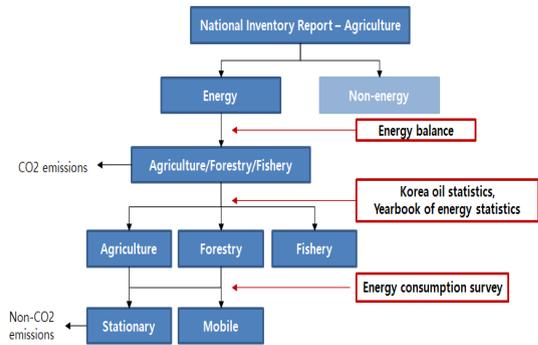


Fig. 1. Activity data for estimating GHG emissions from agriculture category in energy sector

밸런스는 농업어업 부문의 에너지 소비량에 관한 자료를 제공하며, 석유류수급통계는 농업, 임업, 어업 각 부문의 에너지 소비량을 구분할 때 사용된다. CO₂ 배출량은 농업어업 부문 연료 사용량과 식(1)을 이용하여 산정이 가능하다. 에너지경제연구원의 에너지총조사는 CH₄와 N₂O의 배출계수 보정을 위해 필요한 고정연소에 사용된 연료량과 이동연소에 사용된 연료량의 상대적 비중을 추정하기 위해 사용된다.

지금의 농업부문을 포함한 에너지 분야의 온실가스 배출량 산정방법은 하향식 방식으로 간주할 수 있으며, 이러한 하향식 온실가스 산정방법은 제한된 배출계수와 활동자료를 바탕으로 온실가스 인벤토리를 효과적으로 작성할 수 있는 방법이다.

또한 에너지분야 농업부문의 경우, 현재의 방식을 바탕으로 「2006 IPCC 가이드라인」 적용이 가능하다. 구체적으로 「2006 IPCC 가이드라인」의 적용을 위해서는 현행 에너지밸런스보다 세분화된 국제에너지기구(IEA: International Energy Agency, 이하 IEA) 기준 에너지밸런스를 이용하여야 한다. 하지만 농업어업부문의 경우 IEA 에너지밸런스를 적용에도 그 세부부문 배출원의 변화는 없다. 따라서 에너지분야 농업부문에 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용하기 위해서는 CO₂ 배출계수와 CH₄와 N₂O의 배출계수, 평균 연소를 그리고 탄소물질입 등을 보정해 주면 된다. Table 1은 「1996 IPCC 가이드라인」과 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용하였을 경우의 온실가스 배출량 차이를 나타낸다.

Table 1. 2016 GHG Emissions from agriculture and forestry category in energy sector

Unit: Thousand Ton CO₂eq.

GL	Category	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Sum
2006	Agriculture	1,112.993	2.800	58.385	1,174.178
	Forestry	1.623	0.004	0.097	1.724
	Total	1,120.984	2.818	58.485	1,182.287
1996	Agriculture	1,105.722	2.261	2.812	1,110.795
	Forestry	1.616	0.003	0.004	1.623
	Total	1,113.674	2.276	2.820	1,118.770

Note 1: Total reflects the GHG emission from 'Town Gas' which is not accounted for in Agriculture and Forestry sources.

Note 2: Emission factor for diesel farm equipment is applied to mobile emission from oil when applying 2006 IPCC GL.

Note 3: Oxidation factor for CO₂ emission is assumed to be 1 when applying 2006 IPCC GL.

Note 4: Updated Global Warming Potential is applied for CH₄ and N₂O when applying 2006 IPCC GL.

Note 5: Emission factor for diesel is calculated from weighting stationary and mobile emission factors with respective activity data and stationary emission factor is applied for bunker oils when applying 2006 IPCC GL.

Table 1의 「2006 IPCC 가이드라인」 적용 배출량과 「1996 IPCC 가이드라인」 적용 배출량의 차이는 세부 적용 배출계수, 지수 등의 변경에 기인한다. 먼저 CH₄ 및 N₂O에 대한 기본 배출계수를 변경하였다. 특히 석유류 이동연소와 관련하여 「2006 IPCC 가이드라인」에 제시된 디젤 농기계에 대한 배출계수를 적용하였으며 이로 인해 N₂O 배출량이 「1996 IPCC 가이드라인」 적용 대비 높게 산정되었다. 다음으로 CO₂ 연소와 관련하여 완전 연소를 가정하였으며 지구온난화지수는 2007년 IPCC AR4에 따라 CH₄의 경우 21에서 25, N₂O는 310에서 298로 변경 적용하여 산정하였다. 끝으로 경유 및 증유류에 대한 배출계수 적용 시 경유는 이동연소량과 고정연소량의 비율로 각각의 배출계수를 가중평균한 배출계수를 적용하였으며, 증유류는 고정연소에 대한 배출계수를 적용하였다.

하지만 현재와 같은 하향식 온실가스 산정 방법을 바탕으로 파리협정에 대응한 에너지분야 농업부문의 체계적인 감축 정책을 수립하기에는 한계가 있을 수 밖에 없다. 2020년부터 적용되는 파리협정의 권고 수준을 달성하기 위한 농업부문의 2030년 감축 목표치는 2,221 ~ 2,507천 톤 CO₂eq.에 이르며[11], 이 중 에너지분야 농업부문은 1,519천 톤 CO₂eq.(비에너지분야 농업부문은 702~988천 톤 CO₂eq.)이다. 따라서 에너지분야 농업부문 역시 체계적인 감축 계획이 필요하며, 이를 위해서는

보다 구체적인 온실가스 배출량 정보(연소기술, 지역, 품목, 연소조건, 농기계 및 시설 종류 등에 따른 배출량 정보)를 바탕으로 에너지분야 농업부문의 감축 기회 혹은 역량을 파악할 필요가 있다.

다음으로 에너지분야 농업부문 온실가스 배출량의 불확도에 대한 개선이 필요하다. 「2006 IPCC 가이드라인」에 따르면 불확도는 배출량 분포에 대한 불확실한 지식(knowledge)을 의미하며, 배출통계의 신뢰도 혹은 정확성을 의미한다. 파리협정 체제 하에서는 온실가스 배출량 산정의 객관성과 합리성이 더욱더 강조되고 있다. 하지만 우리나라의 경우, 불확도 개선에 대한 연구는 매우 제한적이며, 국가고유 배출계수 개발과 보정이 지속적으로 이루어지고 있음에도 불구하고 배출계수의 불확도 산정과 보정에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

Table 2. Default uncertainty estimates for stationary combustion emission factor(Source: 1996 IPCC GL)

Sector	CH ₄	N ₂ O
Public Power, co-generation and district heating	50-150%	Order of magnitude
Commercial, Institutional and Residential combustion	50-150%	Order of magnitude
Industrial combustion	50-150%	Order of magnitude
Agriculture, Forestry and Fishery	unreported	unreported

Table 3. Level of uncertainty associated with stationary combustion activity data(Source: 1996 IPCC GL)

Sector	Well developed statistical system		Less developed statistical system	
	Surveys	Extrapolation	Surveys	Extrapolation
Main activity electricity and heat production	less than 1%	3-5%	1-2%	5-10%
Commercial, institutional, residential combustion	3-5%	5-10%	10-15%	15-25%
Industrial combustion(Energy intensive industries)	2-3%	3-5%	2-3%	5-10%
Industrial combustion(others)	3-5%	5-10%	10-15%	15-20%
Biomass in small sources	10-30%	20-40%	30-60%	60-100%

에너지분야 농림업부문 불확도는 「1996 IPCC 가이드라인」을 바탕으로 한 에너지산업 부문의 불확도를 동일하게 사용하고 있다. 구체적으로 에너지분야 중 고정연소에 의한 CO₂ 배출량의 불확도 산정 시 활동자료의 불확도는 3%, 배출계수의 불확도는 5%를 사용한다. 또한 CH₄의 활동자료 불확도는 3%, 배출계수의 불확도는 150%이며, N₂O의 활동자료 불확도는 3%, 배출계수의 불확도는 1,000%이다(Table 2, Table 3 참조). 하지만 「1996 IPCC 가이드라인」에서는 농림업 관련 CH₄와 N₂O의 불확도에 대한 정보를 제공하지 않으며, 2017년 국가인벤토리보고서는 에너지 산업부문의 불확도를 그대로 사용하고 있다. 마지막으로 통계자료의 불확도는 「1996 IPCC 가이드라인」에서 제시한 가장 낮은 값을 사용하고 있다.

에너지분야 농업부문의 온실가스 배출량의 불확도 개선을 위해서는 우선 온실가스 배출계수의 불확도 개선이 우선적으로 필요하다. 「2006 IPCC 가이드라인」은 에너지분야 각 부문의 에너지원별 CO₂ 배출계수와 그 불확도 산정에 사용되는 95% 신뢰구간에 대한 정보를 제시하고 있다. 또한 의무 감축국들을 중심으로 국가 고유 에너지분야 고정연소의 CH₄와 N₂O의 배출계수의 불확도가 구축되고 있다. 물론 국가고유 배출계수의 적용이 이루어진 상태에서 「2006 IPCC 가이드라인」이 제시한 에너지원별 배출계수의 95% 신뢰구간에 대한 정보나 다른 국가의 CH₄와 N₂O의 배출계수의 불확도를 우리나라의 에너지분야 농업부문 배출량의 불확도 산정에 사용하는 것은 무리일 수 있다. 하지만 배출량 추정의 고도화와 맞물려 추정된 배출량의 신뢰도 제고를 위해서는 배출계수의 불확도 역시 보다 세분화되고 체계적으로 관리될 필요가 있다.

한편, 2010년부터 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법”이 시행된 이후, 농림업부문에서도 신재생에너지 보급이 확대되어왔다. 신재생에너지 사용으로부터 발생하는 온실가스는 주로 바이오에너지와 폐기물 에너지에서 배출된다[3]. 현재 에너지분야의 신재생에너지 통계 항목은 전량 바이오매스로 간주된다. 우리나라는 「온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침」 제94조 제1항에 따라 바이오매스 사용에 따른 CO₂ 직접배출량은 총 온실가스 배출량 산정에서 제외된다. 하지만 지침에 속하지 않는 다른 온실가스는 총 배출량 산정에 포함되어야 함에도 불구하고 농림업부문의 신재생에너지 사용에서 발생하는 정확한 온실가스 배출량 계측이 이루어지지 않고 있다. 따라서 향후 국가 온실가스 배출 통계

산정 고도화를 위해 에너지분야 농림업부문의 신재생에너지 소비에서 발생하는 non-CO₂ 온실가스 배출량을 산정 방안을 마련할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. 농림업부문 온실가스 인벤토리 작성 개선방안

3.1 세분화된 국가고유 배출계수 개발 및 활동자료 구축

에너지분야 온실가스 배출량은 연료의 종류, 연소 기술, 운영 조건, 제어 기술, 장비의 보수 및 연식 등의 세부조건에 많은 영향을 받는다. 예를 들어 동일한 연소 장비에서 연료를 연소하더라도 장비의 연식에 따라 연소 효율이 다를 수 있으며 이로 인해 온실가스 배출량에도 차이가 발생할 수 있다. 그러나 다수의 국가들은 이러한 요소에 대한 정보를 가지고 있지 못하다는 한계가 있으며 이에 IPCC는 배출량 산정방식을 세 가지 Tier로 나누어 각 국가가 사용할 수 있는 자료에 맞게 산정방식을 선택하도록 하고 있다. 이와 동시에 IPCC는 보다 상위의 방법론 적용을 권고하고 있으며 많은 국가들은 Tier 2 또는 Tier 3 방법을 적용하기 위해 노력하고 있다. Tier 1 방법은 전술한 세부 요소들에 대한 정보가 부재할 때 적용하는 방법으로 국가 에너지통계로부터 얻은 에너지 사용량과 평균 배출계수를 기초로 배출량을 산정한다. Tier 2 방법은 기술별 특성을 고려하여 배출량을 산정하는 것을 나타내며 Tier 3 방법은 개별 기기 또는 활동의 특성을 반영한 산출 방법을 의미한다.

국내 에너지분야 농림업부문은 앞서 밝힌 바와 같이 Tier 1 방법론을 기본으로 하며 적용 가능한 부분에서 Tier 2 방법론을 적용한다. 구체적으로 농림업부문의 경우 휘발유, 경유, 중유류에 대해 고정연소와 이동연소로 구분하여 CH₄ 및 N₂O 배출량을 산정한다. 그러나 실질적으로 고정연소와 이동연소의 구분은 경유에 대해서만 이루어지고 있으며 국가고유 배출계수가 아닌 「1996 IPCC 가이드라인」 상 배출계수를 이용한다는 한계가 있다. 또한 농기계 종류, 농가 규모(경지면적 및 축사면적), 계절 등 온실가스 배출량에 영향을 미칠 수 있는 요소별로 세부적인 구분이 이루어지지 않고 있다. 이러한 한계는 엄밀한 온실가스 배출량 산정을 제한하며 나아가 이를 바탕으로 한 정교한 감축정책 설계를 어렵게 한다는 점에서 향후 지속적인 개선이 필요하다고 판단된다.

이를 위해 먼저 세분화된 국가고유 배출계수의 개발이 요구된다. 예를 들어 국내에서 많이 사용되는 농기계 엔진의 연식, 종류 및 크기 등에 따른 배출계수 개발을 통해 이동연소 내에서도 보다 세분화된 배출량을 산정할 수 있을 것으로 보이며, 이를 바탕으로 관련 정책의 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 「2006 IPCC 가이드라인」에서도 농업부문의 이동연소와 관련하여, 디젤 농기계, 휘발유 4-행정(4-stroke) 농기계, 휘발유 2-행정(2-stroke) 농기계 등 세 가지 분류로 구분하여 기본 배출계수를 제시하고 있다. 국내에서도 국내 농기계 사용 현황을 고려하여 농기계를 세분화하고 각각에 적합한 배출계수를 개발 및 적용할 필요가 있다. 실제 호주에서는 아래 Table 4에서와 같이 농기계를 세 분류로 세분화하여 국가고유 배출계수를 적용함으로써 온실가스 배출량 통계를 작성하고 있다[12]. 미국의 경우 Table 5에서와 같이 농기계 종류는 따로 구분하지 않고 사용 연료(휘발유, 경유)에 따라 상이한 배출계수를 적용하여 온실가스 배출량을 산정하고 있는 것으로 조사되었다[13].

Table 4. Emission factors by farm equipment types in Australia[12]

Type	Unit: g/MJ	
	CH ₄	N ₂ O
Farm equipment-ADO	0.01	0.002
Tractors	0.0096	0.002
Non-tractors	0.011	0.002

Table 5. Emission factors by agricultural equipment types in the U.S.[13]

Type	Unit: g CH ₄ , N ₂ O/gal fuel	
	CH ₄	N ₂ O
Agricultural equipment-Gasoline	1.26	0.22
Agricultural equipment-Diesel	1.44	0.26

배출계수 개발과 함께 기존 조사 자료의 문항을 보완 또는 추가, 별도의 조사 시행, 기존 통계자료와의 연계 등을 통해 새로 개발된 배출계수를 적용할 수 있는 활동자료의 구축도 요구된다. 앞서 농기계 사용으로 인한 이동연소의 예와 관련하여, 농림축산식품부는 아래 Table 6과 같이 매년 국내 농기계 보유현황을 발표하고 있다. 따라서 해당 자료를 바탕으로 주요 농기계별 사용 연료, 평균 이용 일수, 이용 시간 등의 자료를 보완하여 배출계수를 적용할 수 있는 활동자료 구축이 가능할 것으로 판단

된다.

Table 6. 2017 Domestic farm equipment status[12]

Type		Number of equipments
Two-wheel tractor		567,070
Tractor	small-sized	73,403
	medium-sized	148,538
	large-sized	68,205
Speed Sprayer		57,266
Rice transplanter	pedestrian	99,568
	riding	96,136
Tiller	riding	373,732
	pedestrian	33,471
Combine	less than 4 reapers	14,274
	4 reapers	38,971
	more than 4 reapers	23,767
Grain dryer		79,029
agricultural product dryer		245,315

2016년 기준 에너지총조사에서도 농기계 및 장비 종류, 사용 연료 등에 대해 조사를 시행하고 있다. 그러나 앞서 농기계 보유현황 자료와 연계하여 온실가스 배출량 산정을 위한 활동자료로 활용하기에는 기존 통계의 문항 간 정합성이 부족하며 이용 일수 및 이용 시간 등에 대한 문항이 추가될 필요가 있다고 생각된다.

한편, 이현주(2011)가 제시한 바와 같이 비용 및 활용 가치를 비교하여 배출계수 개발의 범위를 규정하는 것이 필요하다[5]. 특히 개발된 배출계수가 온실가스 배출량 산정에 활용되기 위해서는 활동자료와 배출계수의 세분화 수준이 서로 동일하여야 함을 고려할 때 이에 대한 사전 연구를 통해 각 부분의 세분화 방향을 확정함으로써 고도화 과정에서 발생할 수 있는 비효율성을 제어하여야 할 것으로 판단된다.

3.2 불확도 개선 방안

에너지분야 농림업부문 온실가스 배출량의 불확도를 줄이는 가장 근원적인 방법은 관련 국가고유 배출계수들의 불확도 자료를 구축하는 것이다. 「2006 IPCC 가이드라인」은 이미 에너지분야 각 부문의 에너지원별 배출계수의 불확도를 제시하고 있으며, 국가별 CH₄ 및 N₂O 배출계수의 불확도를 제시하고 있다. 이러한 부문별 에너지원별 배출계수 불확도의 구축은 각 부문별 불확도 산정

을 가능하게 하며, 이를 바탕으로 온실가스 배출량의 불확도를 보다 세분화하여 개선·관리할 수 있다.

Table 7은 「2006 IPCC 가이드라인」에 제시되어 있는 에너지분야 농업업부분의 에너지원별 배출계수의 95% 신뢰구간에 대한 자료와 에러전파(error propagation) 방식을 적용하여 2016년 에너지분야 농업업부분의 CO₂ 배출량의 불확도를 산정한 결과이다. 에러전파 방식은 불확도를 가지는 각 변수들은 정규분포를 가지며, 변수들 사이의 상관관계가 적으며, 변수들의 표준편차가 평균의 30% 이내일 경우 적용 가능하다. 본 연구에서는 분석의 편의를 위해 배출계수 간의 상관관계는 없으며 활동자료의 불확도는 이전과 같이 3%라 가정하였다. 마지막으로 배출계수의 불확도는 각 에너지원별 배출계수의 95% 신뢰구간의 상한과 하한에서 배출계수를 차감한 값의 절대값을 평균하여 산출하였다[3].

Table 7. Uncertainty estimates for CO₂ emissions in Agriculture based on 2006 IPCC Guideline

Fuel	CO ₂ Emission	Applying emission factor uncertainty from 2006 IPCC GL	Applying 5% emission factor uncertainty for each fuel
Gasoline	87.332	0.152213	0.209126
Kerosene	274.561	0.794400	2.067002
Diesel	592.840	3.175562	9.636930
B-A	16.762	0.002484	0.007704
B-B	73.613	0.051923	0.148583
B-C	15.637	0.002671	0.006705
Propane	6.792	0.000709	0.001265
Butane	0.511	0.000004	0.000007
Solvent	0.552	0.000003	0.000008
Others	44.945	0.018444	0.055390
Total	1,113.545	4.198412	12.132720
Uncertainty estimates for CO ₂ emissions in Agriculture		2.049003	3.483205

분석 결과, 2016년 에너지분야 농업업부분의 CO₂ 배출량 불확도는 약 2.1%로 산정되었다. 이는 에너지분야 농업업부분의 온실가스 배출량의 95% 신뢰구간에서 하한값이 1,090.181천 톤 CO₂eq.이며, 상한값이 1,136.909천 톤 CO₂eq.임을 의미한다. 또한 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용하였을 때 에너지분야 농업업부분의 CO₂ 배출량 불확도는 배출계수의 불확도를 5%로 고정했을 때보다 약 1.4%p 감소하는 것으로 나타났다. 모든 에너지원을 1로 가정하고 에너지원 별 CO₂ 배출계수들과 배출계수들의 상한과 하한을 각각 합하여 산정한 농업업부분 CO₂ 배출계수의 불확도는 3.47%로 현재까지 사용되고

있는 농업업부분의 CO₂ 배출계수인 5%보다 낮게 산정되었다. 마지막으로 배출량이 가장 많은 경유 사용이 에너지분야 농업업부분 불확도에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 농업업부분의 경유 연소와 관련된 배출계수와 그 불확도의 고도화를 통해 배출량 자료의 개선은 물론 배출량의 자료의 신뢰도 역시 크게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

하지만 「2006 IPCC 가이드라인」 역시 에너지원 별 CH₄ 및 N₂O 배출계수의 불확도를 300%로 일괄 설정하고 있다. 이는 「2006 IPCC 가이드라인」 역시 CH₄와 N₂O 배출계수의 불확도에 대한 연구가 매우 부족함을 의미한다. 하지만 해외에서는 Table 8과 같이 고정연소에 대한 국가별 CH₄와 N₂O 배출계수 불확도를 구축하고 있다. 따라서 불확도의 크기가 상대적으로 큰 CH₄와 N₂O 배출계수의 불확도 구축과 개선을 통해 에너지분야 농업업부분 배출량 불확도를 관리할 필요가 있다.

Table 8. Uncertainty estimates for CH₄ and N₂O stationary combustion emission factors in 2006 IPCC Guideline

GHG	Country	95% CI	Distribution
CH ₄	Austria	±50	Normal
	Finland	-75 ~ 10	Beta
	Norway	-50 ~ 100	Log normal
	Netherlands	±25	
	U.K.	±50	Censored normal
	U.S.	order of magnitude	-
N ₂ O	Austria	±20	Beta
	Finland	-75 ~ 10	Beta
	Norway	-66 ~ 200	-
	Netherlands	±75	-
	U.K.	±100 ~ 200	-
	U.S.	-55 ~ 200	-

농업업부분 온실가스 배출량의 불확도를 줄이는 두 번째 방법은 전문가의 판단을 이용하는 것이다. 「2006 IPCC 가이드라인」은 자료의 결여로 인한 불확도를 줄이는 전략으로 전문가의 판단을 바탕으로 한 불확도 산정을 제안하였으며 또한 자칫 편향될 수 있는 전문가 의견을 방지하기 위해 전문가 이용 가이드라인을 역시 제시하였다. 또한 김동구 외(2018)는 전문가 판단을 바탕으로 에너지원(유연탄, 무연탄, 도시가스 등)의 수요량 분포를 가정하고 이를 반영하여 발전, 철강산업, 비금속광물산업의 불확도를 산정하였다[3]. 하지만 에너지분야 농업업부분의 국

가고유 배출계수 혹은 불확도에 연구가 이제 시작단계인 것을 감안한다면, 관련 분야의 전문가집단의 폭은 상당히 좁을 수 밖에 없으며, 이는 불확도 개선을 위한 전문가 집단의 활용의 장애 요인으로 작용할 수 있다.

3.3 신재생에너지 온실가스 배출량 산정

농림업부문에서 대표적으로 쓰이는 신재생에너지는 지열, 목재펠릿, 태양열 등이 있으며[14], 현재 시설채소 온실에서 사용하고 있는 고체연료 중 신재생에너지가 차지하는 비중은 50%에 육박한다. 또한재생에너지 3020 이행계획 등 정책 방향을 고려하면 농림업에서의 신재생 에너지는 확대될 것으로 예상된다[15]. 따라서 농업분야의 신재생에너지의 비중이 증가함에 따라 농업부문의 재생에너지 관련 온실가스 배출량은 산정 필요성 역시 증가하고 있다고 할 수 있다.

Table 9. Utility rate wood pellet in greenhouses for vegetables

Unit: ha, %

Year	Wood Pellet		Total greenhouse area
	Area	Rate	
2014	542	50.2	1,079
2015	730	55.7	1,310
2016	684	51.8	1,321
2017	606	50.2	1,208

신재생에너지의 배출량을 산정하기 위해서는 배출계수 및 활동자료가 요구된다. 「2006 IPCC 가이드라인」은 아래 Table 10에서와 같이 신재생에너지별 기본 배출계수를 제시하고 있다. 구체적으로 「2006 IPCC 가이드라인」은 에너지분야에서의 바이오매스 연료 산정(treatment of biomass)에 대한 내용을 서술하고 있으며, 가정 및 농림업부문에 대한 바이오매스 연료의 CO₂, CH₄, 그리고 N₂O에 대한 배출계수를 제시하고 있다. 단, CO₂ 배출량은 농업, 임업 및 기타 토지이용(AFOLU: Agriculture, Forestry and Other Land Use, 이하 AFOLU) 분야에 반영되어 있으므로 에너지분야에서 별도로 산정하지 않지만 바이오매스 사용으로 인한 CH₄와 N₂O 배출량은 AFOLU 분야에 반영되지 않으므로 에너지분야에서 별도로 산정하여야 함을 명시적으로 밝히고 있다.

Table 10. Default emission factors for stationary combustion of biofuels in residential and agriculture/forestry/fishing categories

Fuels		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Solid biofuels	wood/wood waste	112,000	300	4
	sulphite lyes	95,300	3	2
	other primary solid biomass	100,000	300	4
	charcoal	112,000	200	1
Liquid biofuels	biogasoline	70,800	10	0.6
	biodiesel	70,800	10	0.6
	other liquid biofuels	79,600	10	0.6
Gas biomass	landfill gas	54,600	5	0.1
	sludge gas	54,600	5	0.1
	other biogas	54,600	5	0.1
other non-fossil fuels	municipal wastes	100,000	300	4

하지만 농업분야의 신재생에너지 활동자료는 아직까지 전무한 상태이며, 이는 에너지분야 농업부문 온실가스 배출량 산정의 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 현재 신재생에너지의 온실가스 배출량은 「에너지통계연보」 내 에너지밸런스에 속해 있는 신재생에너지 자료를 바탕으로 산정된다. 구체적으로 에너지밸런스의 신재생에너지 중 비배출원(태양열, 자가용 태양광, 자가용 풍력, 지열에너지, 자가용 연료전지 등)에서 생산되는 에너지양을 산정한 다음, 이를 에너지통계연보의 신재생에너지 전체 에너지 생산량에서 차감한 자료를 신재생에너지 배출량 산정을 위해 사용하고 있다.

그러나 「에너지통계연보」내 에너지밸런스의 신재생에너지 자료를 바탕으로 신재생에너지 연소에서 발생하는 온실가스 배출량을 정확히 산정하는 데에는 한계가 있다. 이는 신재생에너지 통계가 산업, 가정 상업, 공공기타 용도의 구분 없이 총량으로만 보고되며, 비배출원에서 생산되는 에너지 생산량을 차감한 에너지생산량은 산업, 가정 상업, 공공기타로만 구분되어 각 부분의 에너지 생산량을 기준으로 재분배되기 때문이다. 이에 따라 비배출원에서 생산되는 에너지 생산량과 이를 차감한 신재생에너지의 에너지 생산량을 각 부문에 정확히 배분할 수 없으며, 농림업부문에서 사용되는 신재생에너지의 온실가스 배출량은 따로 산정되지 않고 있다.

이에 반해 해외에서는 농림업부문은 아니지만 바이오매스 사용으로 인한 온실가스 배출량을 각 국가 인벤토리 보고서에 반영하고 있다. 호주의 경우, 특히 가정부문 바이오매스 사용에 대해 아래 식(3)과 같이 난방설비 유

형, 설비의 효율성, 연료(목재) 특성 등 매우 구체적인 정보를 활용하여 온실가스 배출량을 산정하고 있으며 국가 고유 배출계수를 적용하고 있다[12]. 미국 또한 목재 바이오매스 소비와 관련하여 산업, 가정, 상업, 전력생산 등 부문별로 구분된 활동자료를 구축하고 있으며 이를 기반으로 부문별 온실가스 배출량을 산정하고 있다[16].

$$E_{k,n} = F_n \times S \times W \times fn_k \{ \sum PEF_n \} \quad (3)$$

Where, $E_{k,n}$ denotes emission of GHG k in year n, F_n denotes amount of fuel combusted in year n, S denotes softwood use correction factor, W denotes wet wood correction factor, fn_k denotes formula linking the GHG emission factor for gas k, PEF_n denotes weighted particulate emission factor for year n.

신재생에너지 소비에 따른 온실가스 배출량을 산정을 위해 국내에서도 에너지밸런스 내 신재생에너지 통계의 근거 자료인 「신재생에너지 보급통계」를 개선하는 방안을 제시할 수 있다. 구체적으로 「신재생에너지 보급통계」의 신재생에너지 생산량은 일부 에너지원에 대해 사업용과 자가용으로 구분하여 제시하고 있지만, 온실가스 배출량 고도화를 위해서는 부문별 신재생에너지 생산량을 구분하여 제시할 필요가 있다. 그러나 「신재생에너지 보급통계」 개선이 어렵다면 별도의 사례 조사나 설문 조사를 통해 농림업부문에서 사용되는 신재생에너지 기초 통계 자료 구축이 대안이 될 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

2015년 우리나라는 신기후변화체제를 앞두고 자발적 온실가스 감축 목표를 2030년 BAU 대비 37% 감축안을 설정하였다. 또한 정부는 같은 해 12월 “제1차 기후변화 대응기본계획” 및 “2030 국가온실가스감축 기본로드맵”을 발표하였으며[17], 해당 기본계획은 기존의 감축정책 실현에서 나아가 기후변화 적응, 자원 지원, 이행 점검 등을 포괄하고 있다.

이러한 기본계획에서 제시하고 있는 감축 및 적응 정책 설계, 자원 지원, 이행 점검 등을 위해서는 각 부문별 온실가스 배출 현황에 대한 파악이 필수적이며, 구체적인 정책 설계와 효율적인 자원 사용을 위해서는 배출량 통

계가 보다 세분화되어야 한다. 앞서 제시한 바와 같이 국내 관련 정부기관 및 학계에서는 국가고유 배출계수 개발 등 관련된 여러 연구를 진행하고 있으며 향후에도 지속적인 보완이 이루어질 것으로 기대된다.

그러나 에너지분야 농림업부문의 경우 상대적으로 온실가스 배출량 비중이 낮으며 실질적 산정을 농업 관련 기관에서 담당하지 않고 있기 때문에 보다 세분화된 배출량 산정에 대한 논의가 제한적으로 이루어져 왔다. 이에 본 연구는 에너지분야 농림업부문의 온실가스 배출량 통계 작성 현황을 살펴보고 향후 고도화할 수 있는 방안을 제안하고자 하였다.

고도화 방안으로 1) 국가고유 배출계수 개발 및 활동자료 개선, 2) 불확도 개선, 3) 신재생에너지 사용에 따른 온실가스 배출량 고려를 제시하였다. 국가고유 배출계수 개발 및 활동자료 개선의 경우 특히 기존의 국가 통계를 기반으로 농기계류에 대한 세분화가 가능할 것으로 판단된다. 불확도 개선의 경우, 불확도 산정에서의 과정을 완화하여 농업부문 CO₂ 배출량의 불확도를 일부 개선하였으며 향후 전문가 판단을 바탕으로 한 불확도 산정 방안을 검토하였고 농림업부문에서 발생할 수 있는 잠재적 문제점에 대해 제시하였다. 신재생에너지의 경우, 농업부문에서 목재펠릿 및 폐목재를 이용한 난방 등에 따른 배출량을 반영할 수 있는 방안에 대해 검토하였으며, 이를 바탕으로 활동자료의 개선 필요성을 제시하였다.

본 연구는 온실가스 배출량 산정에 관한 연구에서 상대적으로 많이 다루어지지 않던 에너지분야 농림업부문 통계의 개선방안에 대해 논의하였다는 데 의의가 있다고 생각된다. 그러나 이와 동시에 여러 한계점을 가지고 있다. 우선 본 연구에서는 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용하여 에너지분야 농림업부문 온실가스 배출량과 그 불확도를 실증적으로 재산정하였다. 하지만 「2006 IPCC 가이드라인」을 적용을 제외한 나머지 개선방안은 주로 방향성에 대한 논의만 진행하였을 뿐 구체적인 조사 문항, 조사 방식 등의 대안을 제시하지 못하였으며 자료의 부족으로 실증적 사례가 제한적인 점을 주요 한계점으로 지적할 수 있다. 또한 국가고유 배출계수 개발과 관련하여, 배출계수 개발에 소요되는 비용과 개발에 따른 편익을 비교하여 타당성에 대해 논의하여야 하지만 이에 대한 분석이 이루어지지 못하였다. 이에 대해서는 향후 각 세부 방안별로 개선된 연구가 이루어질 필요가 있다고 생각한다. 끝으로 향후 연구에서는 최근 변화하고 있는 농림업 구조와 관련 기술의 변화·발전을 반영한 온실가스 인벤토리 구축 방안이 논의되기를 기대한다.

References

- [1] D. Kim, I. Son, Y. Ahn, S. Lee, D. Noh, D. Yoo, B. Kang, "Analysis on when GHG emissions peak in Korea", Korea Energy Economics Institute, 2018.
- [2] J. Hanna, "Reporting and review procedures of GHG inventories under the UNFCCC and the Kyoto Protocol", *Presentaton at International Conference on National GHG Inventory*, Seoul, Korea, October 2010.
- [3] D. Kim, S. Kim, J. Kim, H. Lee, GHG inventory preparation and quality improvement in energy combustion sector, Korea Energy Economics Institute, 2018.
- [4] Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2018 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 2018.
- [5] H. Lee, "Accuracy Improvement of National Inventory Report in Trasport Sector", *Transportation Technology and Policy*, Vol.8, No.6, pp.99-105, Dec. 2011.
- [6] K. P. Song, S. J. Choi, J. Kim, Y. K. Jang. "A study on the estimation of GHGs emission by military sector", *Journal of Climate Change Research*, Vol.8, No.2, pp.177-186, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15531/KSCCR.2017.8.2.177>
- [7] H. Jeong, G. Kim, S. Lee, J. S. Lee, J. H. Lee, K. So, "Evaluation of greenhouse gas emissions in cropland sector on local government levels based on 2006 IPCC guideline", *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol.45, No.5, pp.842-847, Oct. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7745/KJSSE.2012.45.5.842>
- [8] B. Jeon, K. Lee, H. Jang, S. Kim, "Estimating uncertainty of greenhouse gas emissions in energy sectors using the combined tier method", *Korean Energy Economic Review*, Vol.15, No.1, pp.179-205, Mar. 2016.
- [9] H. Jang, B. Jeon, "An analysis of uncertainties in GHG emissions from steel industry category: estimation by using tier2 method", *Journal of Social Science*, Vol.41, No.3, pp.169-193, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15820/khiss.2015.41.3.008>
- [10] J. Jung, K. Kim, "Estimation of greenhouse gas(GHG) reductions from bioenergy(biogas, biomass): a case study of South Korea", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.33, No.4, pp.393-402, 2017.
- [11] H. Jeong, Y. Kim, H. Lee, Strategy for vitalizing low-carbon emission agriculture adapted to new climate regime, Korea Rural Economic Institute, 2016.
- [12] Australian Government Department of the Environment and Energy, National Inventory Report 2017, 2019.
- [13] United States Environmental Protection Agency, Direct emissions from mobile combustion sources, January 2016.
- [14] D. Park, J. Lee, Y. Lim, S. Sim, Y. Seo, M. Kim, Policy research on new renewable energy in agricultural sector, Science and Technology Policy Institute, 2015.
- [15] J. Park, Y. Kim, "The effects of renewable energy in agricultural sector", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* Vol.20, No.1, pp.224-235, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.1.224>
- [16] United States Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2017, 2019.
- [17] S. Lee, Y. Lim, J. Sung, H. Ahn, H. Lee, H. Lee, The impact of the new climate regime on the agriculture, livestock and food sectors and countermeasures(year 1 of 2), Korea Rural Economic Institute, 2017.

추 성 민(Sungmin Cheu)

[정회원]



- 2018년 2월 : 서울대학교 대학원 농경제사회학부
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국농촌경제연구원 연구원

<관심분야>

에너지, 기후변화

문 지 혜(Jihye Moon)

[정회원]



- 2016년 2월 : 조선대학교 생물학과
- 2018년 5월 ~ 현재 : 한국농촌경제연구원 연구원

<관심분야>

에너지, 기후변화

김 연 중(Yeanjung Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 전북대학교 대학원
농업경제학과 박사
- 1997년 7월 ~ 현재 : 한국농촌경
제연구원 선임연구위원

<관심분야>

ICT, R&D, 생명산업, 농업에너지

성 재 훈(Jae-hoon Sung)

[정회원]



- 2016년 12월 : 미 아이오와주립대
학교 경제학박사
- 2016년 10월 ~ 현재 : 한국농촌경
제연구원 부연구위원

<관심분야>

기후변화, 농업자원관리